

Multi-phase 인버터 특성해석

오진석⁺, 조관준⁺⁺, 곽준호⁺⁺, 진선호⁺⁺, 유병량⁺⁺, 임명규⁺⁺, 이홍찬⁺⁺⁺

Characteristic Analysis of Multi-Phase Inverter

Jin-Seok Oh, Kwan-Jun Jo, Jun-Ho Kwak, Sun-Ho, Jin, Byong-Rang Yu, Myoung-Kyu Lim, Hong Chan Lee

Abstract : This paper is analyzed the characteristic of multi-phase inverter for the electric propulsion system. Two BLDC motors with 3 and 7 phases are designed with these features in order to simulate the effect of increasing the number of phases. From the simulation results, the 7-phase given better performance in terms of torque pulsation. Also, the torque pulsation can be reduced further by increasing the number of phases.

Key words : Permanent-magnet propulsion motor(영구자석 추진전동기), Brushless DC motor(브러쉬리스 직류 전동기), Multi-phase(다상), Cogging torque(코깅 토크)

기호설명

ω_m : 기계 각속도
 T_e : 전동기 토크
 e_X : (X=a,b,c)상역기전력(3상 BLDC의 경우)
 e_X : (X=A,B...)상역기전력(7상 BLDC의 경우)
 i_X : (X=a,b,c)상전류(3상 BLDC의 경우)
 i_X : (X=A,B...)상전류(7상 BLDC의 경우)
L: 전동기 권선 인덕턴스(각 상당)
Ls: 전동기 권선 자기 인덕턴스(각 상당)
M: 전동기 상호 인덕턴스(각 상당)
R: 전동기 권선 저항

1. 서론

반도체 분야의 급속한 발전과 더불어 선박에 활용되는 제어시스템에도 많은 변화가 발생하고 있다. 기

존의 디젤 선박보다 진동 및 소음 측면에서 월등히 유리한 점을 가진 전기추진 선박에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

전기추진 선박의 추진시스템의 핵심요소는 인버터와 추진전동기이다. 인버터가 추진전동기에 취부되는 형태에 따라 독립형, 외장형, 내장형 등으로 구분된다. 또한 이러한 인버터로 제어되는 추진전동기는 일반적인 용어로 PMPM(Permanent Magnet Propulsion Motor)이라 한다. 이러한 PMPM은 회전자 영구자석으로 구성된 형태의 BLDC(Brushless DC motor)와 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)이 주로 사용된다.

본 연구에서는 0-150 rpm 범위의 저속 BLDC를 제어할 수 있는 BLDC에 적합한 MP(Multi-Phase) 인버터 특성에 대하여 체계적인 해석을 수행하고, 연구수행결과를 활용하여 대용량 MP 인버터를 설계하는 기초 자료를 확보하고자 한다.^{[1][2]}

⁺ 오진석(한국해양대학교 선박전자기계공학부), E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4283
⁺⁺ 한국해양대학교 대학원
⁺⁺⁺ 이홍찬 한국해양대학교 선박전자기계공학부

2. 전기추진 전동기

2.1 추진전동기 개요

전기추진시스템에 많이 활용되는 전동기는 BLDC와 PMSM 및 SM(Synchronous Motor)이 있다. SM은 회전자가 권선형태의 전자석으로 되어 있는 형태이며 외부 권선 형태는 PMSM과 같은 형태이다. BLDC와 PMSM은 회전자가 영구자석의 형태로 되어 있다.

전기추진시스템에 활용되는 전동기는 BLDC 전동기와 PMSM 전동기가 가장 많이 활용되고 있다. BLDC와 PMSM은 구조적으로 회전자가 영구자석으로 되어 있는 공통점이 있다. 하지만 두 전동기는 전기 제어적인 측면에서 매우 큰 차이점을 가지고 있다. BLDC모터의 경우에는 이상적으로 가정할 때 역기전력 파형이 사다리꼴의 형태이고 PMSM의 경우는 정형파의 형태를 갖게 된다. 또한 전류의 파형에 있어서도 BLDC의 경우에 있어서는 구형파의 형태를 나타내는 것에 반해 PMSM의 경우에 있어서는 정형파의 형태를 나타내는 차이점이 있다.

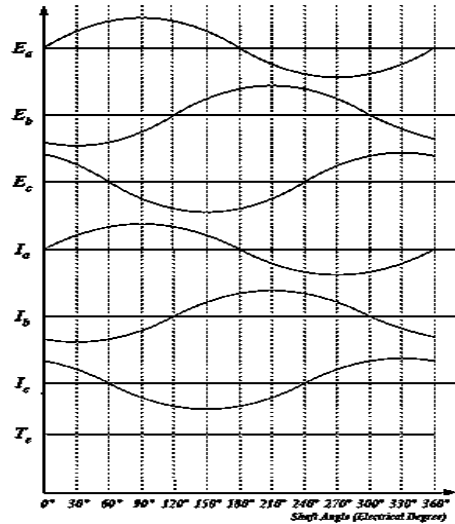
2.2 PMSM과 BLDC 특성

PMSM과 BLDC는 회전자가 영구자석이라는 공통점이 있지만 역기전력과 전류의 파형이 차이가 있음을 앞서 언급하였다. 이러한 차이에 의하여 BLDC와 PMSM의 특성은 큰 차이가 난다. BLDC 전동기의 토크와 역기전력 전류의 관계를 나타내면 식(1)과 같다.

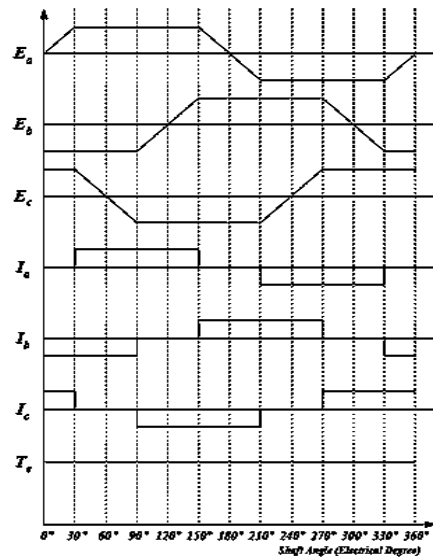
$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (1)$$

식(1)에서 알 수 있듯이 기계각 속도(ω_m)가 일정할 때 각상의 전류(i_a, i_b, i_c)와 각상의 역기전력(e_a, e_b, e_c)의 곱의 합으로 토크(T_e)가 발생함을 알 수 있다.

Fig.1은 이상적인 경우의 각상의 역기전력과 상전류, 토크의 파형을 보여준다. 상전류는 중복되는 부분이 없이 정확하게 구형파의 형태가 되는 것을 알 수 있다.



(a)PMSM



(b)BLDC

Fig. 1 Waveforms of back-EMF and phase current

본 연구에서는 BLDC를 이용한 추진시스템에 대하여 연구하고자 한다. Fig.1 (b)에 도시한 바와 같이 전류 파형이 정확하게 구형파의 형태가 되므로 역기전력 파형과 전류 파형의 곱의 합이 일정하게 되는 것을

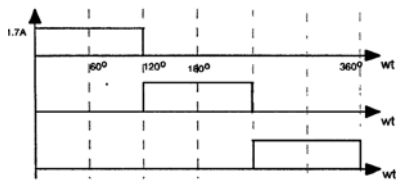
알 수 있다. 때문에 일정 기계적인 각 속도라고 가정하면 일정한 토크를 얻을 수 있다.

하지만 실제의 경우에 있어서 정확한 구형과 전류의 파형을 얻는 것이 전동기 코일에 의한 리액턴스 성분 때문에 불가능하다. 각 상의 전류 파형이 중복되는 부분이 발생하게 되고, 이것은 상이 변하는 시점이 된다. 상이 변화하는 시점에서 전류 파형의 중복으로 인하여 일정한 토크가 생성되지 않고, 토크의 맥동이 생기게 된다. 이렇게 기계적인 각도에서의 상전환에 의한 토크의 맥동을 Cogging 토크라고 한다.

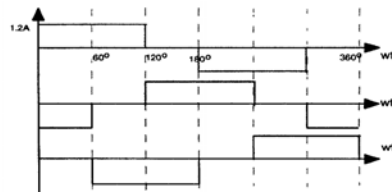
Fig.1 (a)에서 알 수 있듯이 PMSM의 역기전력 파형과 전류 파형은 정현파의 형태를 나타내고 있다. 또한 PMSM의 경우에 있어서는 역기전력 파형과 전류 파형이 3상평형을 이루고 있는 것을 알 수 있다. 때문에 상전환시에 생기는 코깅 토크는 발생하지 않는다. 그렇지만, PMSM의 경우 인버터에 의한 고속 스위칭이 필요하므로 토크리플이 발생한다. 이러한 토크리플은 인버터에 의하여 발생하며, 그 주파수가 수 kHz 이므로 토크의 맥동은 큰 문제가 되지 않는다.

토크맥동 측면에서 PMSM이 BLDC에 비하여 장점을 가지고 있다. 하지만 BLDC는 PMSM에 비하여 출력토크가 큰 장점이 있다. 그러므로 BLDC를 이용하여 추진 시스템을 설계하기 위해서는 Cogging 토크를 저감하기 위한 여자 방식의 개선과 다 상화를 하는 것이 바람직하다.

2.3 BLDC의 여자 방식



(a)unipolar



(b)bipolar

Fig.2 Waveforms of back-EMF and phase

BLDC 토크리플을 저감하기 위해서는 전동기 여자 전류 파형은 unipolar 방식보다는 bipolar 방식을 사용하는 것이 바람직하다.

Fig 2는 BLDC모터의 여자 방식에 대한 여자전류파형을 비교한 것이다. unipolar 방식에 의한 Peak 전류는 bipolar 방식 보다는 높다. 이 두 방식의 특성을 정리하면 표 1과 같다

Table 1 Comparison of 3-phase motors with the reference

| motor description | current Waveform | MAX. Tor que | Avg. tor que | torque ripple |
|-------------------|------------------|--------------|--------------|---------------|
| 3-ph 12slot | 120 bipolar | 0.4943 | 0.4632 | 13% |
| 3-ph 12slot | 120 unipolar | 0.3662 | 0.3272 | 23.7% |

Table 1에서 알 수 있듯이 bipolar 방식이 unipolar 방식에 비하여 토크리플과 최대 토크 측면에서 우수한 것을 알 수 있다. 그러나 bipolar 방식은 unipolar 방식에 비하여 상수가 $2n+1$ ($n=1, 2, 3, \dots$)의 상이 되어야 한다는 단점이 있다. 또한 bipolar 방식이 unipolar 방식에 비하여 제어가 어려운 단점이 있다.^[3]

3. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 BLDC 전동기의 Cogging 토크를 저감하기 위해 다상 BLDC 전동기에 적합한 bipolar 방식의 다상 인버터에 대한 특성을 고찰하고자 한다.

Matlab 6.5를 이용하여 다상 BLDC 전동기와 인버터의 특성을 고찰하기 위해, 3상과 7상 BLDC 전동기를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 다른 요소들

을 같게 하기 위하여 여자 방식은 bipolar 방식으로 통일하였고, 각 전동기에 인가되는 전압은 100V DC로 하였다.^[4]

Fig. 3은 BLDC의 등가 회로이다.

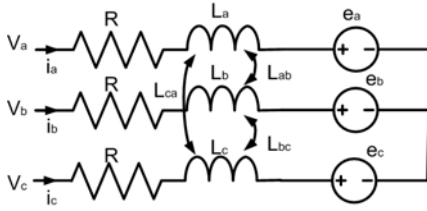


Fig. 3 Equivalent circuit of 3-phase BLDC motor

3상 권선의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 3상 자기 인덕턴스(L_a, L_b, L_c)에 변화가 없다고 가정하고, 상호인덕턴스(L_{ab}, L_{bc}, L_{ca})가 동일하다고 가정하면 식 (3)과 같이 L_s 와 M 으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_s &= L_a = L_b = L_c \\ M &= L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} \end{aligned} \quad (3)$$

이때 전동기의 저항과 인덕턴스가 일정하다고 가정하면 $i_a + i_b + i_c = 0$ 이므로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 $L=L_s-M$ 으로 전압 방정식을 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때 출력 P_{out} 은 식(6)과 같다.

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = T_c \omega_m \quad (6)$$

Fig. 4는 7상 BLDC 모터의 등가 회로 이다.

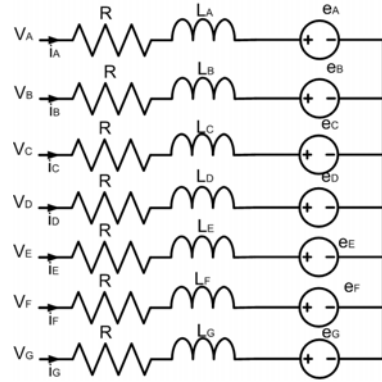


Fig. 4 Equivalent circuit of 7-phase BLDC motor

7상의 경우도 3상의 경우와 마찬가지로 자기 인덕턴스가 일정하고, 상호 인덕턴스가 변화가 없다고 가정하면 식(7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{s\tau} &= L_A = L_B = \dots = L_F = L_G \\ M &= L_{AB} = L_{BC} = \dots = L_{FG} = L_{CA} \end{aligned} \quad (7)$$

또한 저항과 자기 인덕턴스가 일정하다고 가정하면 $i_A + i_B + i_C + i_D + i_E + i_F + i_G = 0$ 전압 관계식을 (8)로 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_X &= R i_X + (L_X - M) \frac{d i_X}{dt} + e_X \\ (X &= A, B, C, D, E, F, G) \end{aligned} \quad (8)$$

이때 출력은 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C + \\ &e_D i_D + e_E i_E + e_F i_F + e_G i_G \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 5의 (a)는 3상 BLDC 전동기용 인버터 구조이고, (b)는 7상 인버터 구조이다. 그림과 같이 H-bridge를 이용하여 각각의 코일을 결선하는 구조로 시스템을 구축하여 시뮬레이션 하였다.

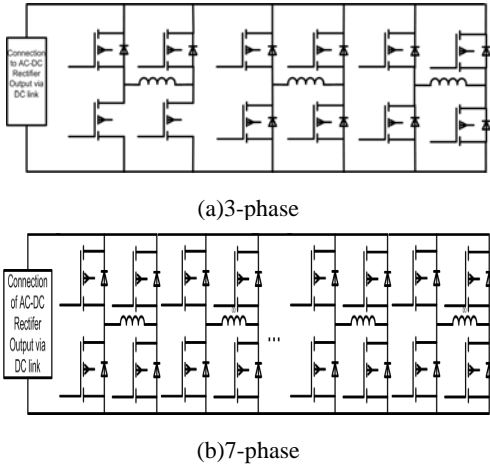


Fig. 5 Inverter schematic of BLDC

모델링 식에서는 인버터의 손실을 0으로 생각하여 모델링 하였다. 수학적 모델링 식과 인버터 구조를 바탕으로 Fig. 6과 Fig. 7에 도시한 바와 같이 시뮬레이션 블록을 만들었다.^[5]

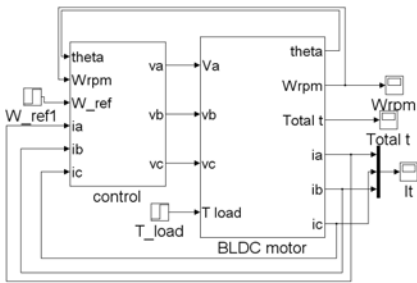


Fig. 6 Simulation Block of 3-phase BLDC

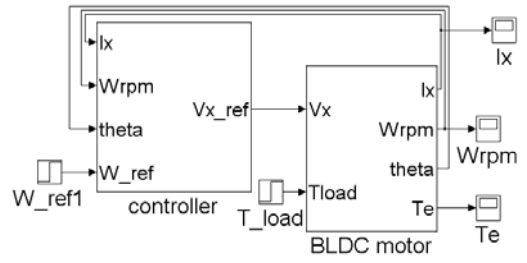
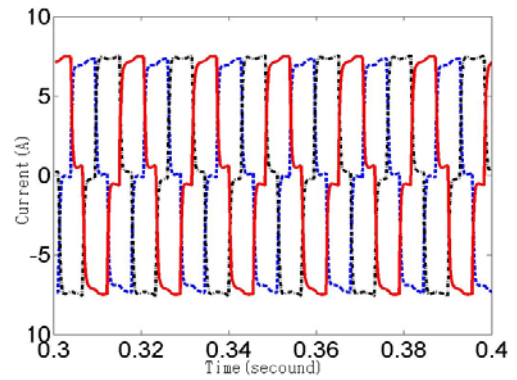
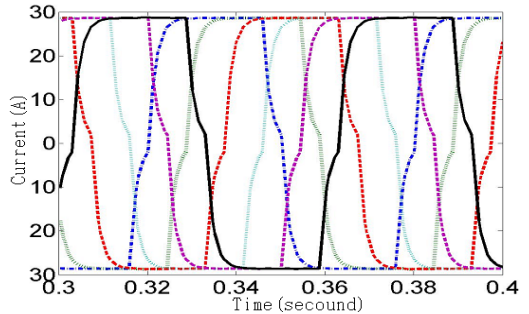


Fig. 7 simulation Block of 7-phase BLDC

Fig.8 (a)는 3상 BLDC의 정상상태에서의 상전류 파형을 나타낸 것이다. 전류 파형에서 알 수 있듯이 전기자 인덕턴스에 의한 왜곡으로 인하여 각각의 전류가 상전환시 꺾이는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 7상 BLDC의 정상상태에서의 전류 파형을 나타낸 것이다. 3상 BLDC의 전류 파형과 비교하면 알 수 있듯이 7상의경우 전류가 중첩되는 부분이 적어진다.



(a) 3-phase

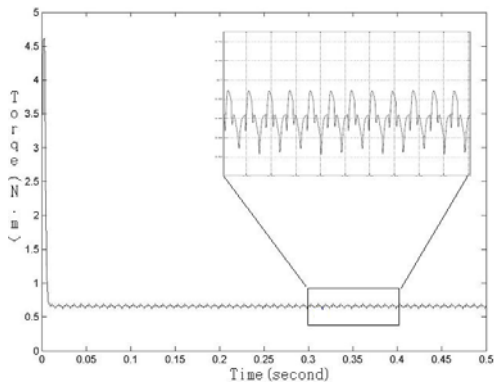


(b) 7-phase

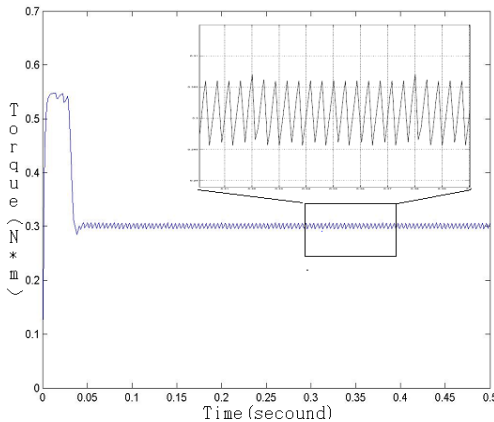
Fig. 8 Phase current waveform of BLDC motor

이러한 상전환시의 전류파형의 중첩으로 인하여 전류 맥동이 생기게 되고, 이것은 토크 맥동으로 이어진다.

Fig. 9의 (a)는 3상 BLDC모터의 토크 파형을 나타낸 것이다. 이때 토크 맥동 주파수 120Hz 이고, 토크 맥동 진폭은 0.068 N·m이다. Fig.9의 (b)는 7상 BLDC모터의 토크 파형을 나타낸 것이다. 토크 맥동 주파수는 230Hz 이고 맥동 진폭은 0.0117 N·m이다.



(a) 3-phase



(b) 7-phase

Fig. 9 Torque waveform of BLDC motor

7상 BLDC가 3상 BLDC에 비하여 토크 맥동 진폭은 줄어들고, 맥동 주파수는 늘어났다.^{[6][7]}

4. 결론

본 논문에서는 BLDC모터의 3상과 7상을 수학적으로 모델링 하여 보았다. 이 모델링을 기반으로 하여 Matlab simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 통하여 다 상화 할 경우 토크 맥동 진폭이 감소하는 것을 검증 하였다. 그러므로 저 진동이 요구되는 전기 추진 시스템용 추진 전동기 제어용 인버터는 토크 맥동 저감 특성이 우수한 다상 인버터를 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] McCoy, T.J., "Full scale land based testing of the U.S. Navy's Integrated Power System (IPS)," Proceedings of the 5th International Naval Engineering Conference, p. 155-162, INEC (2000).
- [2] "Baseline Prime Power System Used by the University of Texas," UT-CEM report, 2003.
- [3] 강병희, "토크맥동 최소화를 위한 BLDC전동기의 시스템의 해석 및 설계" 2002.8
- [4] R. Krisbnan, "A Novel Single Switch per Phase Converter Topology for Four-Quadrant PM Brushless DC Motor Drive: Conference Record, IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 311-318, 1996.
- [5] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet drives, Part 11: The Brushless DC Motor Drive," IEEE Trans. on Ind. App, Vol. 5, No.2, March/April 1989.
- [6] A.K. Wallace and R. Spee, "The simulation of Brushless DC drive failures" pp. 199-206, PESC '88 Record.
- [7] Marcelo Godoy Simões, Petronio Vieira, Jr. A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine-A Perspective Application for Electric Vehicles IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 5, OCTOBER 2002